



УДК 621.313.13

К ОЦЕНКЕ УГЛОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ВЕНТИЛЬ- НО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

TO THE EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC TORQUE OF THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Базилевич Никита Айдарович, магистрант каф. электрических машин, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: bazilevich.n@gmail.com.

Денисенко Виктор Иванович, д-р.техн. наук, профессор каф. электрических машин, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, E-mail: v.i.denisenko@urfu.ru.

Гайфутдинов Александр Рифкатович, аспирант кафедры электрических машин, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, E-mail: alexzanderg@mail.ru.

Храбрый Екатерина Алексеевна, учащаяся бакалавриата кафедры электрических машин, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, E-mail: exrabrykh@mail.ru.

Bazilevich Nikita Aidarovich, graduate student department of electrical machines, Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin, E-mail: bazilevich.n@gmail.com.

Denisenko Victor Ivanovich, Doctor of technical Sciences, Professor of the department. of electrical machines, Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin, E-mail: v.i.denisenko@urfu.ru.

Gayfutdinov Alexander Rifkatovich, post-graduate student department of electrical machines Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin. E-mail: alexzanderg@mail.ru.

Khrabrykh Ekaterina Alekseevna, a student of bachelor's degree department of electrical machines, Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin. E-mail: exrabrykh@mail.ru.

Аннотация: В данной статье представлены результаты расчета электромагнитного момента индукторной машины без системы управления с использованием пакета Femm 4.2. Полученная характеристика сравнивается с экспериментальными данными и с результатами аналитического расчета.

Abstract: This article presents the results of calculating of electromagnetic torque of the switched reluctance motor without a control system using the Femm 4.2. The obtained characteristic is compared with the experimental data and with the results of the analytical calculation.

Ключевые слова: электромагнитный момент индукторной машины.

Keywords: electromagnetic torque of the switched reluctance motor.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

С развитием технологий, требования к электрическим машинам, как к электромеханическим преобразователям энергии, продолжают расти. Однако резервы к улучшению их показателей за счет традиционных средств, практически исчерпаны. Одним из путей дальнейшего совершенствования процесса управления электромеханическим преобразованием энергии является путь, связанный с непосредственным управлением преобразованием. В этом случае, одним из перспективных электромеханических преобразователей при создании интеллектуальных систем регулируемого электропривода является вентильно-индукторный двига-

тель (ВИД), представляющий из себя неразрывное сочетание индукторной электрической машины и системы управления [1].

Благодаря ряду преимуществ, таким как простота и технологичность конструкции, отсутствию скользящего контакта и обмотки на роторе, простейшей конструкции обмотки статора, состоящей из сосредоточенных катушек, особенно перспективно применение регулируемого электропривода на основе ВИД для работы в тяжелых условиях эксплуатации, в агрессивных средах, а также в экстремальных условиях воздействия радиационных полей и высоких температур. Но, несмотря на

простоту конструкции, электромеханические процессы, протекающие в ВИД, имеют сложный характер, связанный с непрерывно протекающими, даже в номинальном режиме работы, переходными процессами. Электрические и магнитные величины ВИД носят ярко выраженный несинусоидальный характер, что не позволяет использовать при расчете традиционные методы, применяемые при проектировании классических электрических машин.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ВИД

В связи со сложностью применения классических методик расчета и отсутствием достаточного опыта проектирования ВИД, важным инструментом в такой ситуации становится использование пакетов прикладных программ для численного моделирования магнитного поля, таких как Femm, позволяющих быстро и с достаточной точностью получить необходимые характеристики. Использование Femm позволяет учесть нелинейные свойства электротехнической стали, учесть локальное насыщение головок зубцов, возникающее при их частичном перекрытии. Одной из важнейших характеристик, определяющих работу ВИД, является его электромагнитный момент. В связи с этим, был проведен расчет электромагнитного момента ВИД с использованием пакета Femm 4.2. Характер изменения поля в зависимости от углового положения ротора приведен на рис. 1. Были рассмотрены две модели двигателей: опытный образец ВИД с керамической изоляцией катушек статора конфигурации 6/4, с длиной магнитопровода 120 мм, мощностью 2,2 кВт, номинальной частотой вращения ротора 1000 об/мин и двигатель с повышенным коэффициентом электромагнитной редукции скорости, мощностью 0,25 кВт, длиной магнитопровода 40 мм, частотой вращения 30-150 об/мин и внешним диаметром статора 150 мм. В такой машине каждый полюс статора имеет мелкую зубцовую структуру. Для оценки результатов расчета, с применением Femm была снята экспериментальная угловая характеристика электромагнитного момента на опытном образце двигателя конфигурации 6/4 керамической изоляцией катушек. Одна из фаз двигателя была запитана током от источника постоянного напряжения. Вращающий момент, возникающий на валу двигателя, определялся по методу рычага с помощью цифрового динамометра. Расчеты и измерения производились при величине тока обмотки статора $I = 5$ А, близкой к номинальному значению. Кроме того, был произведен расчет электромаг-

нитного момента двигателей на основе энергетического подхода [2]:

$$M_{эм} = \frac{\partial W_m}{\partial \theta} = \frac{\Delta W_m}{\Delta \theta} \quad (1)$$

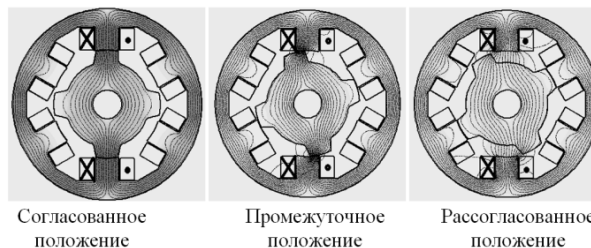


Рис. 1. – Картина поля ВИД конфигурации 6/4 при различных положениях ротора

При расчете электромагнитного момента, производная была представлена как отношение приращения магнитной энергии активной фазы двигателя к приращению углового положения ротора. Ниже будет показано влияние шага по угловому положению на результаты расчета. Результаты оценки электромагнитного момента ВИД конфигурации 6/4 с использованием Femm, экспериментальным путем и с помощью энергетического подхода представлены в таблице 1 и на рис. 2.

Таблица 1
Зависимости статического момента ВИД конфигурации 6/4, полученных при помощи Femm 4.2 с экспериментальными и расчетными данными

θ°	Femm 4.2	Опытный образец		Энергетический подход	
	M , Нм	M , Нм	$\theta^\circ_{ср}$	W_m , Дж	M , Нм
0,0	0,000	0,000	0,00	1,558	0,0000
2,5	3,086	3,412	1,25	1,497	3,808
5,0	4,539	4,221	3,75	1,391	5,267
7,5	5,331	4,791	6,25	1,266	5,974
10,0	5,727	5,114	8,75	1,129	6,407
12,5	5,947	5,298	11,25	0,985	6,589
15,0	5,948	5,336	13,75	0,84	6,566
17,5	6,038	5,474	16,25	0,697	6,703
20	6,042	5,856	18,75	0,546	6,977
22,5	6,093	5,987	21,25	0,391	6,293
25	2,924	1,957	23,75	0,27	3,808
27,5	1,698	0,740	26,25	0,224	1,573
30,0	0,829	0,399	28,75	0,201	0,805

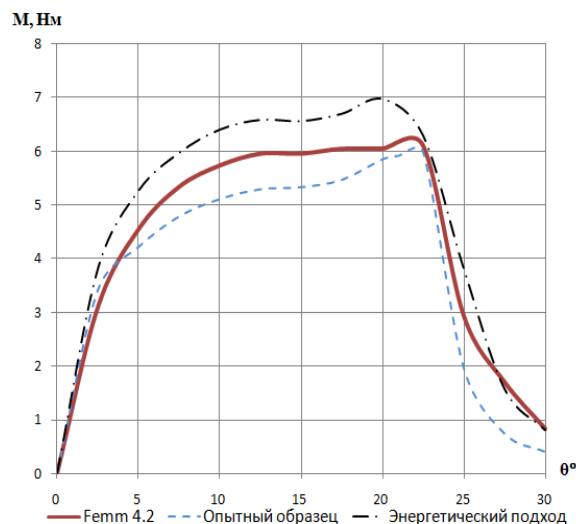


Рис. 2. Зависимости статического электромагнитного момента ВИД конфигурации 6/4 от углового положения ротора

Сопоставление результатов расчета статического момента ВИД, полученных с помощью Femm с экспериментальными данными, дало достаточно удовлетворительный результат. Отличие расчетных кривых от зависимостей, полученных экспериментальным путем, возможно связано с влиянием неучтенных моментов сопротивления при измерении вращающего момента на опытном образце двигателя. Кроме того, влияние на результаты опыта могли оказать и неучтенные технологические факторы, такие как отклонение заявленной величины воздушного зазора, магнитная и электрическая несимметрия, возможное несоответствие электротехнической стали, используемой в опытном образце, заявленным характеристикам. Безусловно, сказалась на результатах опыта и случайная погрешность измерений. Тем не менее, следует отметить, что максимальные значения моментов и в том и в другом случае возникают при одинаковых значениях углов рассогласования, после прохождения которых, момент резко падает, что связано с локальным насыщением зоны перекрытия зубцов, которое приводит к резкому увеличению эквивалентного воздушного зазора.

На рис. 3 и в таблице 2 представлены результаты расчетов угловой характеристики электромагнитного момента тихоходного ВИД (рис. 4) с повышенным коэффициентом электромагнитной редукции скорости, выполненных с использованием Femm 4.2 и энергетического подхода с различными

шагами по угловому положению ротора. В данном случае наблюдается существенное расхождение результатов расчета, что связано с большим значением шага h по углу поворота ротора. При уменьшении значения шага вдвое ($h = 0,175^\circ$), полученная зависимость приближается к эталонной кривой, полученной непосредственно с помощью пакета Femm 4.2. Возникшие сложности приводят к необходимости дополнительных исследований условий использования энергетического подхода для расчета электромагнитного момента для ВИД с мелкой зубцовой структурой сердечников статора и ротора.

Таблица 2

Сравнение зависимостей статического момента ВИД с электромагнитной редукцией скорости, полученных при помощи Femm 4.2 с расчетными данными

θ°	Femm 4.2 М, Нм	Энергетический подход		
		$\theta_{\text{ср}}^\circ$	W_m , мДж	$M_{\text{расч}}$, Нм
0,000	0,074	0,0000	205,00	0,000
0,175	1,070	0,0875	204,50	0,164
0,350	1,624	0,2625	202,46	0,668
0,525	1,942	0,4375	199,10	1,102
0,700	2,163	0,6125	194,70	1,438
0,875	2,284	0,7875	189,47	1,713
1,050	2,395	0,9625	183,51	1,951
1,225	2,479	1,1375	177,01	2,130
1,400	2,535	1,3125	170,17	2,238
1,575	2,534	1,4875	163,15	2,299
1,750	2,557	1,6625	155,97	2,351
1,925	2,602	1,8375	148,67	2,390
2,100	2,626	2,0125	141,31	2,411
2,275	2,606	2,1875	133,91	2,422
2,450	2,605	2,3625	126,51	2,424
2,625	2,594	2,5375	119,21	2,390
2,800	2,557	2,7125	112,16	2,306
2,975	2,446	2,8875	105,71	2,113
3,150	2,177	3,0625	100,08	1,843
3,325	1,654	3,4125	95,31	1,561
3,500	1,060	3,5875	91,49	1,250
3,675	0,551	3,7625	89,12	0,777
3,850	0,121	3,9375	88,10	0,334

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, результаты проведенного сравнения позволяют говорить о перспективности использования пакетов прикладных программ для численного моделирования магнитного поля ВИД, поскольку они позволяют учесть нелинейные свойства электротехнической стали и другие факторы, не учитываемые в традиционных методиках, но существенно влияющие на протекание электро-механических процессов в ВИД.

В дальнейшем планируется автоматизировать расчет характеристик, используя программные средства пакета, с целью сократить время расчета при варьировании параметров двигателя, с чем неизбежно приходится сталкиваться на этапе проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов В. А. Вентильно-индукторные двигатели / В. А. Кузнецов, В. А. Кузьмичев - М.: издательство МЭИ, 2003. – 70 с. // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. №12. 2012 г.
2. Вентильные индукторно-реактивные двигатели / Ю. А. Голландцев – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003 – 148 с.
3. Кузнецов В. А., Садовский Л. А., Виноградов В. Л., Лопатин В. В. Особенности расчета индукторных двигателей для вентильного электропривода. // Электротехника 1998. №6.
4. Кузнецов В. А. Усилия, действующие на зубцы электрических машин. // Тр. МЭИ. Вып. 656. 1992.
5. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control. – Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993. 205 p.

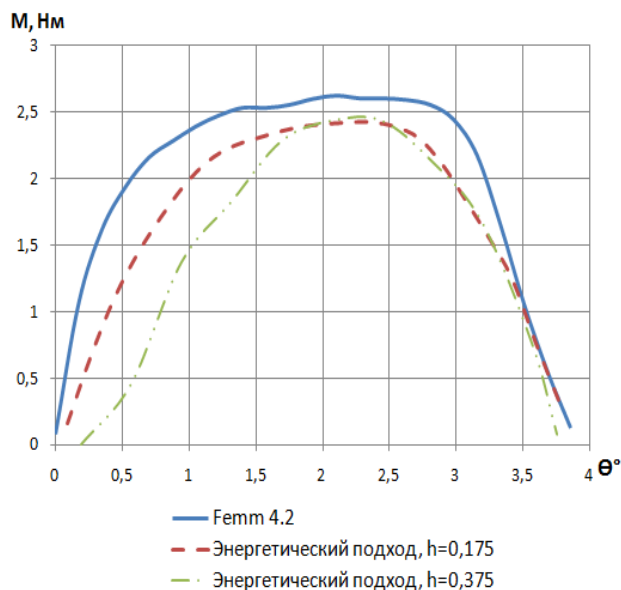


Рис. 3. Зависимости статического момента ВИД с электромагнитной редукцией скорости от углового положения ротора

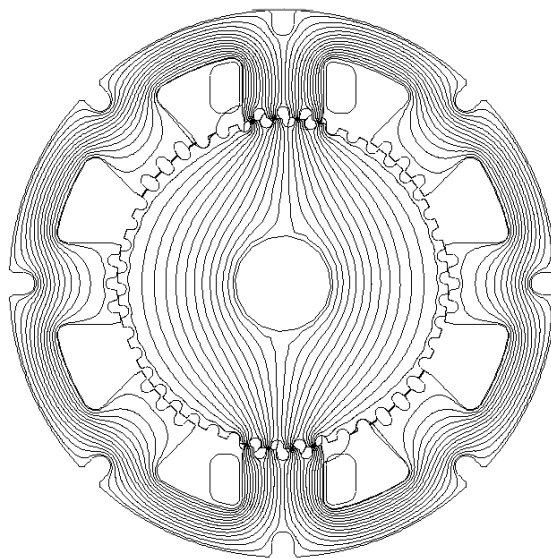


Рис. 4. Картина поля ВИД с повышенным коэффициентом электромагнитной редукции скорости